

A VÁROSI HŐMÉRSÉKLETI TÖBBLET TERÜLETI ELOSZLÁSÁNAK STATISZTIKUS MODELLEZÉSE A BEÉPÍTETTSÉGI PARAMÉTER ALAPJÁN, SZEGEDEN ÉS DEBRECENBEN

Bottyán Zsolt¹ – Unger János² – Szegedi Sándor³ – Gál Tamás⁴

1. Bevezetés

A városi települések leginkább kutatott éghajlati sajátossága az ún városi hősziget (Urban Heat Island, UHI), mely az erősen urbanizált részek és a külterületek között kimutatható jelentős hőmérsékleti különbségben realizálódik. A hősziget intenzitása a városi területek esetében szignifikáns időbeli és térbeli változást mutat (Oke, 1997; Kuttler, 1998). Általánosságban elmondhatjuk, hogy a hősziget markáns kifejlődéséhez kedvező időjárási helyzetet a csapadék hiánya, a szélcsend vagy gyenge szél és a kevés felhőzet jellemzi. A kialakult hősziget intenzitásának maximumát leggyakrabban néhány órával napnyugta után tapasztalhatjuk (Oke and Maxwell, 1975).

A városi hőmérsékleti többlet – a hősziget – kialakításában meghatározó szerepet játszó fizikai folyamatok rendkívül bonyolultak, hiszen időbeli lefutásuk gyors és egy erősen változó geometriájú és sokféle anyagminőségű városi felszínen keresztül fejtik ki hatásaikat. Ennek ellenére, a szakirodalomban fellelhetőek az UHI intenzitás becslésére statisztikus modellek: pl. szélesség, területhasznosítási típusok, népesség alapján (Park, 1986); rövidhullámú besugárzás, szélesség és felhőzet mennyisége alapján (Chow et. al., 1994); beépítettség arány, magasság, szélesség, idő, hőmérsékleti amplitudó alapján (Kuttler et. al., 1996); beépítettség arány, égbolt-láthatósági index, épületmagasság, vízfelszín arány alapján (Bottyán and Unger, 2003).

Munkánk során – a fentiekből kiindulva – statisztikus modellek segítségével adunk becslést az átlagos maximális UHI intenzitás területi eloszlására Szegeden és Debrecenben, figyelembe véve a városi felszín eltérő beépítettségi tulajdonságát, valamint az évszakos változékonyságot.

2. Vizsgált területek és módszerek

Szeged és Debrecen földrajzi elhelyezkedése (orográfiai zavaró tényezőktől mentes síkságon fekszenek), népességszámuk (kb. 160,000 illetve 220,000 lakos) és a különböző városmorfológiai típusok fellelhetősége (sűrű beépítettségű belváros, nagy panelházak alkotta lakótelepek, ipari körzetek, családi házas kertvárosi övezetek, parkok zöldterületei, és a külterületek mezőgazdasági földterületei) különösen alkalmassá teszi e két várost arra, hogy egy viszonylag zavartalan városi klíma jellegzetességeit tanulmányozzuk.

A vizsgálathoz szükséges hőmérsékleti értékeket a 2002. április és 2003. március között mérőautóval történt egyidejű – mindkét helyen egyszerre történő – méréssorozat szolgáltatta. Ennek során mindkét városban egyidejűleg két-két mérőautóval előre rögzített útvonalon haladva gyűjtöttük az adatokat. A kapott hőmérsékleti értékek különböző meteorológiai viszonyok között mért adatok, ami a feldolgozás szempontjából alapvető fontosságú. Az adatgyűjtéshez és a további vizsgálatokhoz két egységes – mindkét város jelentős részét lefedő – 0,5x0,5 km-es felbontású gridhálót fektettünk le a vizsgált területre, melyeken belül meghatároztuk a mérési útvonalak északi és déli hálózatát (1 - 2. ábra). A mért adatokat

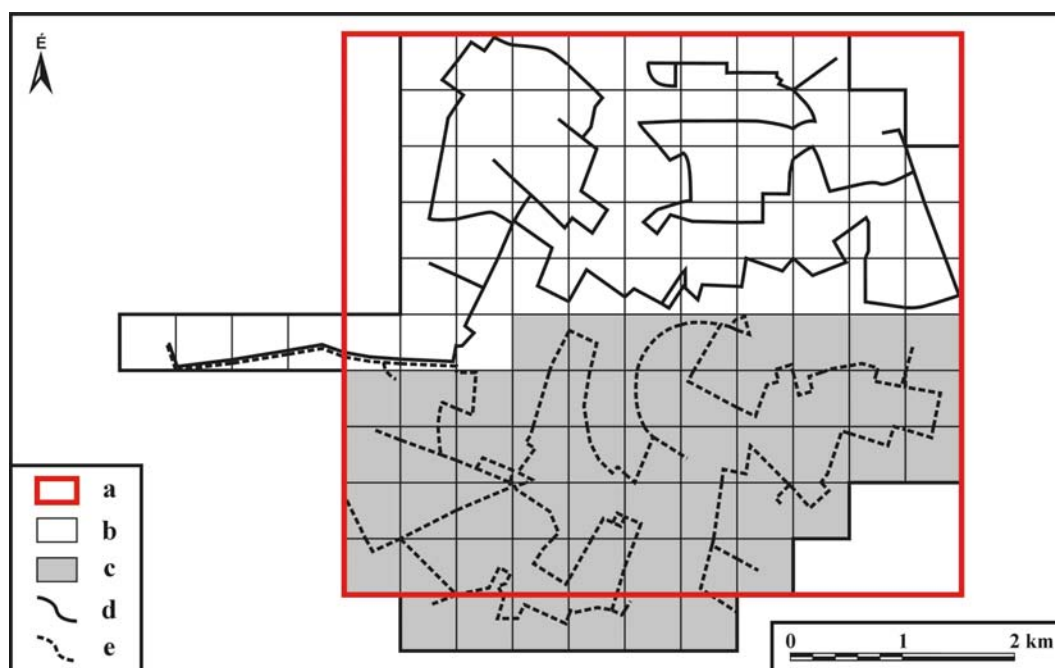
¹ tanszéki munkatárs, Debreceni Egyetem, Erőforrásgazdálkodási Tanszék, zbottyán@helios.date.hu

² egyetemi docens, Szegedi Tudományegyetem, Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék, unger@geo.u-szeged.hu

³ egyetemi adjunktus, Debreceni Egyetem, Meteorológia Tanszék, szegedis@delfin.klte.hu

⁴ egyetemi hallgató, Szegedi Tudományegyetem

cellánként átlagolva, elvégezve a lineáris korrekciót és ebből kivonva a külterületen elhelyezkedő referencia-állomás (Országos Meteorológiai Szolgálat) hőmérsékleti értékét, megkaptuk minden egyes cellára vonatkozóan az aznapi maximális hősziget-intenzitás értékét (Sümeghy and Unger, 2003; Szegedi and Kircsi, 2003). A teljes mérési időszakot két intervallumra osztottuk fel aszerint, hogy a mintavétel a fűtési (október 16 – április 15) vagy a nem-fűtési (április 16 – október 15) félévbe esett. Ez a felosztás a két félév eltérő fizikai-energetikai folyamatai és a fűtési időszak jelentős antropogén hőtermelésének figyelembe vételével történt. A teljes mintavételi területet leszűkítettük az összehasonlítás érdekében, így jelen tanulmányunkban a vizsgált területet az 1. és 2. ábrán pirossal jelölt régió jelenti. Ez nem jelent jelentős korlátozást, hiszen a városi beépített részek több, mint 90%-át lefedik mindkét esetben, ugyanakkor az összevetést megkönnyíti.

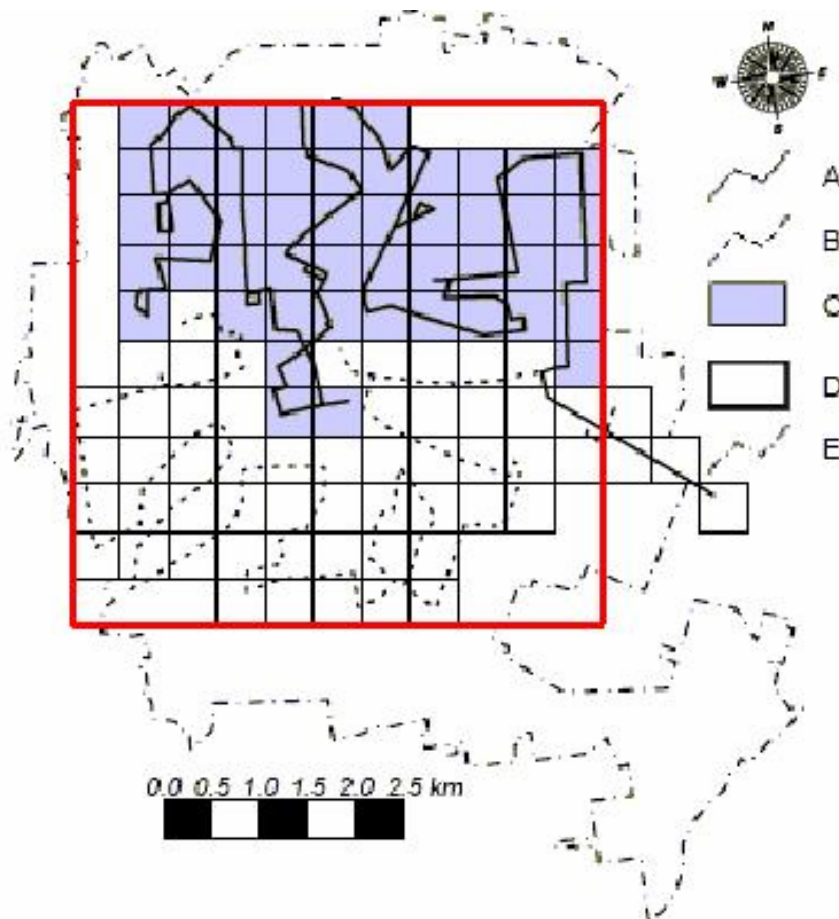


1. ábra Az adatgyűjtés területe és az alkalmazott 0,5x0,5 km-es gridháló Szegeden: (a) a jelenleg vizsgált terület határa, (b) a gridhálózat északi része, (c) a gridhálózat déli része, (d) a mérés útvonalának északi része és (e) a mérés útvonalának déli része

Korábbi vizsgálatokból kiderült, hogy a városi felszín anyagi és geometriai tulajdonságai befolyásolják a hőmérsékleti többlet területi eloszlását (Unger *et al.*, 2000). Ugyanakkor azt is látnunk kell, hogy amíg a hőtöbblet területi eloszlása szinte kizárólagosan a beépített területek felszínének fizikai tulajdonságainak területi eloszlásától függ, addig a maximális UHI intenzitás értékét az adott város rövid időskálájú meteorológiai viszonyai szabályozzák.

A városi felszín fizikai-geometriai tulajdonságait többféle paraméterrel lehet jellemezni, melyek közül az egyik legfontosabb az ún. beépítettségi arány (B), mely egy adott gridcellára vonatkozóan a beépített területek %-os arányát mutatja az adott cella teljes területéhez viszonyítva. Ennek a városi felszíni paraméternek a meghatározása a SPOT műhold XS felvételének kiértékelésével, GIS módszerek kombinálásával, majd az ún. Normalizált Vegetációs Index (Normalised Difference Vegetation Index, NDVI) számításával történt. Az NDVI a képpontok (pixelek) a látható (0,58 – 0,68 μm) és a közeli infravörös (0,72 – 1,10 μm) sugárzási tartományban mért értékeiből került meghatározásra minden pixelre vonatkozóan (Gallo and Owen, 1999).

Munkánk során a feladatunk tehát az volt, hogy minél jobb becslést adjunk az UHI intenzitás (ΔT) területi eloszlására az ismert beépítettségi arány (B) segítségével. Ennek megvalósításának érdekében az említett beépítettségi arány és az átlagos maximális hősziget-intenzitás közötti kapcsolatot tártuk fel – mindkét városra vonatkozóan – a beléptetési többváltozós lineáris regresszió-analízis segítségével. Korábbi vizsgálataink egyértelműen kimutatták, hogy jelentős lineáris kapcsolat létezik e két paraméter között Szeged esetében, valamint a város szerkezetéből fakadóan, a középponttól mért távolság is igen erős prediktornak mutatkozott (Unger *et al.*, 2000). Ez egy adott – jelen esetben Szeged – erősen koncentrikus városszerkezet esetén természetes is, de egy kevésbé szabályos körszerű struktúra is mutat hasonló tulajdonságot, hiszen az épületek a város magjában szinte mindig koncentrálnak. Tehát Debrecen esetében is számolnunk kellett a középponttól való távolság és az UHI intenzitás kapcsolatával. Másrészt, az is ismert, hogy egy város adott pontján kialakuló UHI intenzitás értéke nem csak a közvetlen, hanem a tágabb környezet beépítettségi mutatóitól is jelentősen függ (Bottán and Unger, 2003). A fentebb leírtak alapján egy olyan modellt alkottunk meg, amely implicite tartalmazza az UHI intenzitás távolságfüggését is, de prediktorként csak a beépítettségi arány értékeivel becsül.



2. ábra A vizsgált terület Debrecenben: (A) a mérés útvonalának északi része, (B) a mérés útvonalának déli része, (C) a gridhálózat északi része, (D) a gridhálózat déli része, (E) a város belterületének határa. Piros vonallal a jelenleg vizsgált terület határát jelöltük. A mérési kezdőpont a legkeletibb cellában volt.

A modell lényege, hogy minden egyes gridcellához hozzárendeltük még a távolság négyzetével fordítottan arányban súlyozott beépítettségi értékeit is, melyeket a teljes vizsgált terület gridcelláiból határoztunk meg (valójában ezek az értékek egy fokozatosan táguló

koncentrikus körgyűrűk mentén elhelyezkedő gridcellák beépítettségi arányainak az átlaga, mely körgyűrűkből a városok területe és a gridhálózat alapján három különíthető el). Így minden gridcella négy beépítettségi arány értékkel rendelkezett ezután (B, B1, B2, B3, ahol a B az eredeti gridcellára kapott szám, a B1, B2, B3 pedig a kiterjesztésekből adódó beépítettségi értékek). Majd ezután a beléptetési többváltozós lineáris regresszió segítségével meghatároztuk azokat a prediktorokat, melyek valóban fontos szerepet játszanak az UHI intenzitás becslésében (Bottyán and Unger, 2003).

3. Eredmények

A mobil mérési technika segítségével kapott és a fentebb említett módon származtatott átlagos maximális hősziget-intenzitás területi eloszlását elemezve megállapítható, hogy Szeged esetében mindkét félév során alapvetően koncentrikus jellegű a hősziget elhelyezkedése, mely jól illeszkedik a város hasonló szerkezetéhez, de lokálisan jelentős eltérések is előfordulnak. Általánosságban annyi mondható el, hogy míg a fűtési szezonban a legmagasabb átlagos maximális UHI intenzitás értéke $2,6^{\circ}\text{C}$, addig a nem-fűtésiben $2,8^{\circ}\text{C}$ volt és mindkét félévben a város centrumában helyezkedett el a maximuma (Sümeghy and Unger, 2003). A debreceni mérések alapján elmondhatjuk, hogy ebben a városban is a nem-fűtési félévben volt magasabb az UHI intenzitás értéke ($2,5^{\circ}\text{C}$), míg a fűtésiben pedig $2,1^{\circ}\text{C}$. Másfelől Debrecen városszerkezete kevésbé koncentrikus jellegű, így ez a tény természetesen a hőtöbblet eloszlásában is megmutatkozik, ugyanakkor viszont az UHI intenzitás területi eloszlása mindkét félévben hasonló struktúrát mutat (Szegedi and Kircsi, 2003).

Miután a feldolgozandó adatok eloszlása alapvetően befolyásolja az alkalmazható vizsgálati módszert ill. a kapott eredmények értelmezhetőségét és értelmezését, ezért előzetesen megvizsgáltuk, hogy empirikus eloszlásfüggvényeik statisztikailag reálisan normális eloszlásúnak tekinthetők-e. Ennek során kiderült, hogy a ΔT , valamint a B faktorok mintája egyaránt normális eloszlást követ. A hipotézis-vizsgálatokat a *khi-négyzet próba* segítségével végeztük el.

E tények ismeretében a paraméterek közötti kapcsolatok realitásának eldöntéséhez a regressziós együtthatók szignifikanciájára helyeztük a hangsúlyt. Ezután a már említett lineáris regresszió-analízis alkalmazásával meghatároztuk a regressziós becslés prediktorait, paramétereit és ezek együtthatóit, majd végül a szignifikanciáját is a fokozatos beléptetés elvét alkalmazva mindkét félév esetében. A kapott regressziós becslés paramétereit, korrelációs együtthatóit és a szignifikancia szinteket Szeged esetében az 1. táblázat, míg Debrecen esetén a 2. táblázat tartalmazza.

A kapott modell-egyenletek Szeged nem-fűtési (Egy. 1), Szeged fűtési (Egy. 2), valamint Debrecen nem-fűtési (Egy. 3) és Debrecen fűtési (Egy. 4) időszakának vonatkozásában egyaránt igen erős lineáris kapcsolat meglétét igazolják, ezért biztonsággal állíthatjuk, hogy csupán a figyelembe vett statikus beépítettségi prediktor és az adott módon számított kiterjesztései alapján megfelelő pontossággal lehet becsülni a hősziget maximális intenzitását mindkét város esetében. Az is nyilvánvaló, hogy a nem-fűtési időszakban a modell is markánsabb ΔT értéket jelez, mint a fűtésiben, ami összhangban van a mért adatokkal.

A továbbiakban – a négy modell-egyenletet alkalmazva – előállítottuk mindkét időszakra vonatkozóan a ΔT paraméter területi eloszlását Szegeden és Debrecenben. Ehhez minden gridcella esetén, amelyekhez rendelkezésünkre állnak a prediktor paraméterek adatai, kiszámítottuk a becsült ΔT -t és a kapott értékeket izovonalak segítségével ábrázoltuk a várost lefedő gridhálón. Az ábrázolás során alkalmazott interpoláció a *Kriging-eljárás* volt, mely gyakran alkalmazott módszer hasonló feladatok esetében.

1. táblázat A többváltozós korrelációs együtthatók értékei és szignifikancia szintek az átlagos maximális hősziget-intenzitás és a beépítettségi paraméterek között a vizsgált időszakokra vonatkozóan Szegeden (elemszám, $n = 96$)

Időszak	Beléptetett paraméter	Többvált. $ r $	Többvált. r^2	Δr^2	Szign. szint
április 16 – október 15 (nem-fűtési félév)	B1	0,737	0,543	0,000	0,1%
	B1, B	0,801	0,641	0,098	0,1%
	B1, B, B3	0,820	0,673	0,022	0,1%
	B1, B, B3, B2	0,858	0,736	0,063	0,1%
október 16 – április 15 (fűtési félév)	B3	0,777	0,603	0,000	0,1%
	B3, B	0,842	0,709	0,106	0,1%
	B3, B, B1	0,860	0,739	0,030	0,1%

2. táblázat A többváltozós korrelációs együtthatók értékei és szignifikancia szintek az átlagos maximális hősziget-intenzitás és a beépítettségi paraméterek között a vizsgált időszakokra vonatkozóan Debrecenben (elemszám, $n = 101$)

Időszak	Beléptetett paraméter	Többvált. $ r $	Többvált. r^2	Δr^2	Szign. szint
április 16 – október 15 (nem-fűtési félév)	B1	0,561	0,315	0,000	0,1%
	B1, B3	0,588	0,346	0,031	0,1%
Október 16 – Április 15 (fűtési félév)	B3	0,451	0,203	0,000	0,1%
	B3, B1	0,505	0,255	0,052	0,1%
	B3, B1, B2	0,552	0,305	0,050	0,1%

$$\Delta T = 0,0008B1 + 0,0064B - 0,0733B3 - 0,0323B2 + 8,073 \quad (\text{Egy. 1})$$

$$\Delta T = -0,0361B3 + 0,074B + 0,0114B1 + 2,789 \quad (\text{Egy. 2})$$

$$\Delta T = 0,0226B1 - 0,0324B3 + 2,065 \quad (\text{Egy. 3})$$

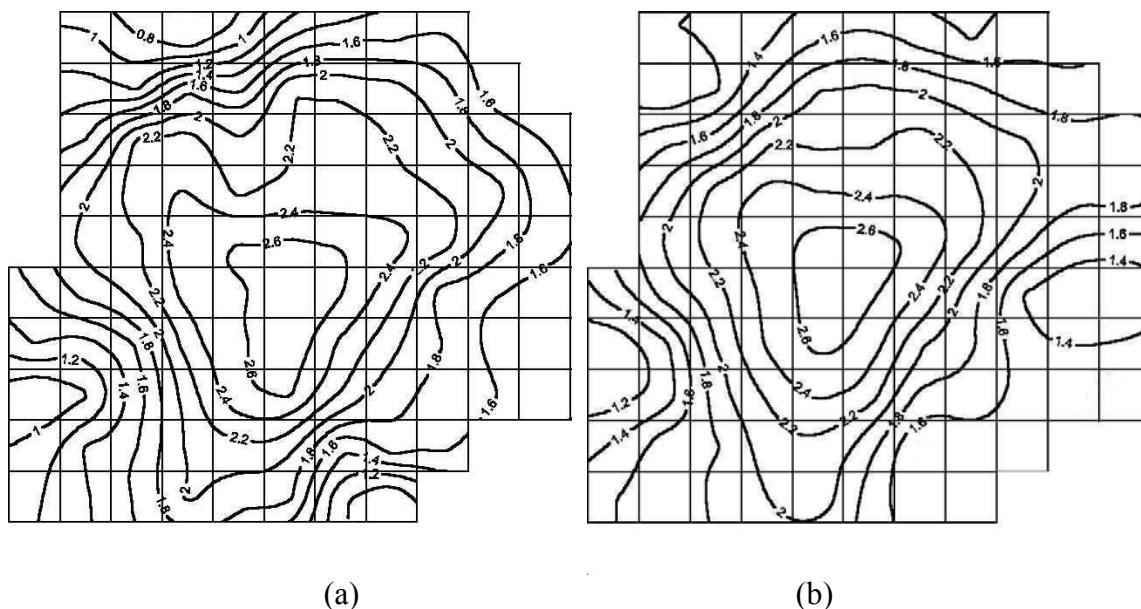
$$\Delta T = -0,0424B3 + 0,0125B1 - 0,0154B2 + 3,281 \quad (\text{Egy. 4})$$

Mindkét város esetében elmondhatjuk, hogy a nem-fűtési szezonra kapott területi eloszlás izovonalainak futása jól követi a mért értékekből megrajzolt kétdimenziós eloszlás vonalainak rajzolatát, ugyanakkor természetesen eltérések is kimutathatók. Szeged esetében markánsan megjelenik a vonalak kinyúlása ÉK-i irányban a nagy kiterjedésű panelházak alkotta lakótelep irányába és így torzul a hősziget koncentrikus jellege. Az is jól megfigyelhető, hogy a Tisza mentén kissé megtörik a görbék futása, mintegy jelezve a folyó enyhén módosító, kissé hűtő közegét (3. ábra).

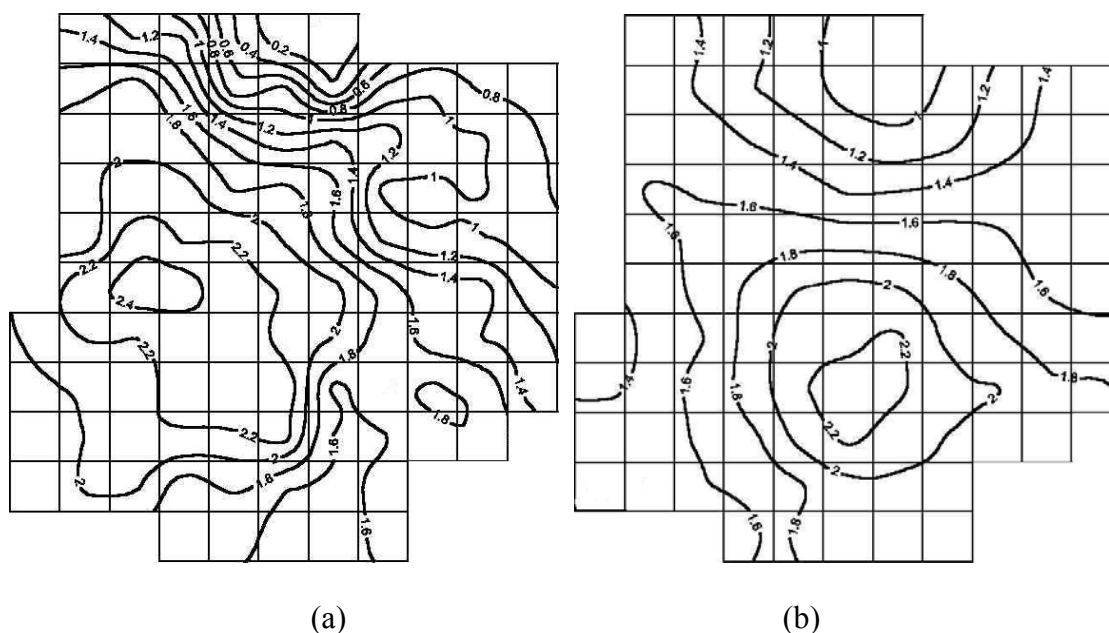
Debrecen kevésbé koncentrikus városszerkezete jól visszatükröződik a mért és a modell által meghatározott hőmérsékleti többlet eloszlásában egyaránt. Jól megfigyelhető, hogy az izovonalak futásában van egy ÉNy-DK-i tengely mentén való elrendeződés, ami alapvetően a város északi peremén elhelyezkedő nagy területű erdős-ligetes területnek köszönhetően alakult ki. A mért és a számított UHI intenzitás mező egyaránt nagy gradienssel csökken ebben az irányban, ami jól egybeesik a szintén itt megfigyelhető erős beépítettség-csökkenéssel. A város Ny-i és DNy-i területin elhelyezkedő lakótelepek nagy blokkházai itt is módosítják az izovonalak futását és ezen a területen mértük a legmagasabb UHI intenzitás értékeket is, amit – kis hibával - a modell által számított értékek is követnek (4. ábra).

Másrészt fontos észrevenni, hogy ebben az időszakban mindkét vizsgált terület esetén rendkívül gyorsan csökken a hőmérsékleti többlet az erősen beépített É-i panelházak lakótelepek és a külterületek között. Ennek magyarázata az lehet, hogy nyáron a betonból

készült házak nagyon sok hőt tárolnak, míg a környéken kifelé hirtelen csökken az épületek száma és mérete, így a csapdába ejtett hő mennyisége is. Ez az erős gradiens sokszor mérhető, mikro- és mezo-skálán megjelenő légáramlást indukál, melynek iránya a város központi része felé mutat (Kuttler *et al.*, 1996).

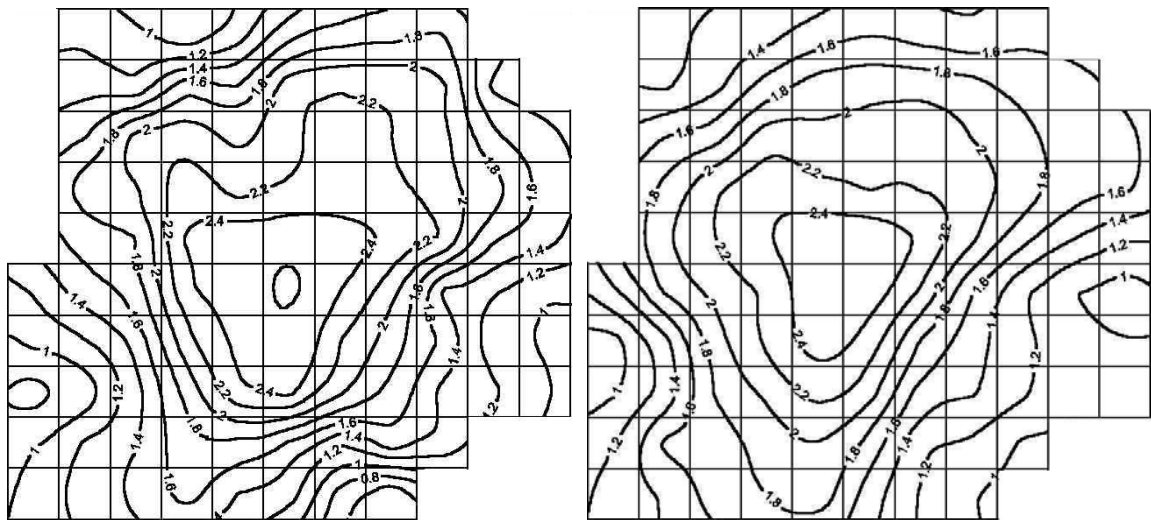


3. ábra (a) A mért és (b) a modellegyenlet segítségével számított átlagos maximális városi hősziget-intenzitás (°C) területi eloszlása a vizsgált területen a nem-fűtési időszakban Szegeden



4. ábra (a) A mért és (b) a modellegyenlet segítségével számított átlagos maximális városi hősziget-intenzitás (°C) területi eloszlása a vizsgált területen a nem-fűtési időszakban Debrecenben

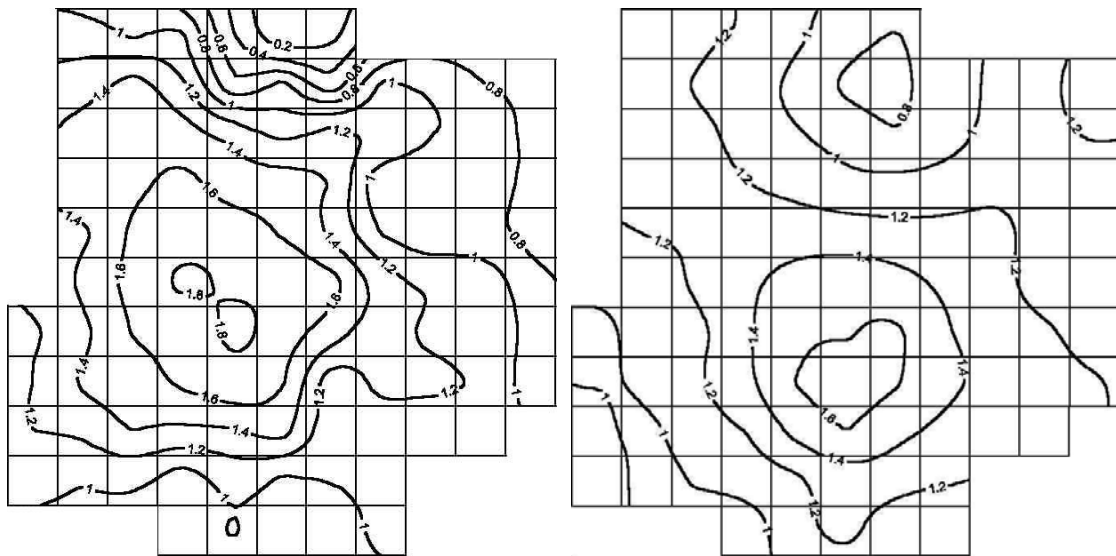
A fűtési időszakban mindkét város esetén a mért ΔT mező kevésbé markáns hősziget intenzitást mutat, mint a nem-fűtési szezonban. Ugyanakkor Szegednél azok a koncentricitást megtörő hatások, melyekről fentebb beszéltünk, szintén jelentkeznek (5. ábra).



(a)

(b)

5. ábra (a) A mért és (b) a modellegyenlet segítségével számított átlagos maximális városi hősziget-intenzitás (°C) területi eloszlása a vizsgált területen a fűtési időszakban, Szegeden



(a)

(b)

6. ábra (a) A mért és (b) a modellegyenlet segítségével számított átlagos maximális városi hősziget-intenzitás (°C) területi eloszlása a vizsgált területen a fűtési időszakban Debrecenben

Debrecenben is alapvetően megmarad a hősziget területi eloszlásának struktúrája, de hasonlóan a nem-fűtési időszakhoz, most is jól észrevehető, hogy a becsült maximális UHI intenzitás értékének helye kissé DK-i irányban eltolódott a mért legmagasabb érték pozíciójához viszonyítva.

A modell által becsült és a mért adatokból előállított UHI intenzitás értékek területi eloszlásának szerkezete mindkét város esetén, mindkét vizsgált félévben nagy hasonlóságot mutat, ami azt bizonyítja, hogy a beépítettségi arány felszíni eloszlása és a hősziget-intenzitás területi eloszlása között igen szoros kapcsolat van. Ez egyben azt is jelenti, hogy lényegében a város beépítettségének területi szerkezete alapján határozza meg a város felett megjelenő maximális hőmérsékleti többlet térbeli struktúráját.

Ugyanakkor azt is látnunk kell, hogy a modell által becsült UHI értékek alatta maradnak a mért adatoknak (pl. a maximális értékek becslése esetén a becsült adatok rendre mintegy 0,2°C-kal alacsonyabbak mindkét város esetében), ami azt jelenti, hogy a hőmérsékleti többlet számértékeinek pontosabb becsléséhez további városi paraméterek bevonása is szükséges lesz a jövőben.

Következtetések

Jelen tanulmányban a beépítettségi arány, mint városi felszíni paraméter segítségével becslést adtunk az átlagos maximális hősziget-intenzitás (ΔT) térbeli eloszlására a vizsgált féléves időszakokban Szeged és Debrecen területére. Az eredmények a következőkben foglalhatók össze:

- A ΔT mérési adatokból származtatott területi eloszlása Szegeden mindkét időszakban koncentrikus szerkezetű, követve ezzel a város hasonló struktúráját, míg Debrecenben egy ÉNy-DK-i irányú tengely mentén torzul a körszimmetria. A hősziget intenzitása a városok közepe felé haladva növekszik, de a beépítettség és az eltérő anyagi szerkezetű épületek okozta anomáliák jól megfigyelhetők (panel építésű lakótelepek, jelentős növényzettel borított parkok és ipari negyedek).
- A statisztikai vizsgálatok eredményei alapján a beépítettségi arány (B) és annak területi kiterjesztései (B1, B2, B3) erős lineáris kapcsolatot mutatnak a ΔT -vel, vagyis a kapott négy modell-egyenlet nagy pontossággal írja le a hősziget-intenzitás területi eloszlását mindkét város esetén.
- Az értékét tekintve is pontosabb UHI értékbecslés megvalósításához további városi felszíni paraméterek bevonása szükséges a modellbe, melyeknek segítségével korrigálhatóak a jelenlegi modell kisebb hibái.
- Összességében elmondhatjuk, hogy a statikus paraméterek alapján történő területi statisztikus becslés megbízható alapot szolgáltat a hősziget-intenzitás meteorológiai paraméterek bevonásával történő, időbeli és térbeli eloszlásának előrejelzéséhez, amely kutatásunk további, egyben legfontosabb célja is.

Köszönetnyilvánítás – A kutatást az Országos Tudományos Kutatási Alapprogram (OTKA T/034161) támogatta. Külön köszönet illeti Dr. Mucsi László egyetemi docenst a beépítettség arányainak megállapításáért. Ezen kívül köszönet illeti Kircsi Andrea és Sümeghy Zoltán tanársegédek az ábrák elkészítésében nyújtott segítségükért.

IRODALOM

- Bottyán, Z. and Unger, J.**, (2003) A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island. – *Theor. Appl. Climatol.* 75, 233-243.
- Chow, S.D., Zheng, J. and Wu, L.**, (1994) Solar radiation and surface temperature in Shanghai City and their relation to urban heat island intensity. – *Atmos. Environ.* 28, 2119-2127.
- Gallo, K.P. and Owen, T.W.**, (1999) Satellite-based adjustments for the urban heat island temperature bias. – *J. Appl. Meteorol.* 38, 806-813.
- Kuttler, W.**, (1998): Stadtklima. – In *Stadtökologie* (eds: **Sukopp, H. und Wittig, R.**). Gustav Fischer, Stuttgart-Jena-Lübeck-Ulm, 125-167.
- Kuttler, W., Barlag, A-B. and Roßmann, F.**, (1996) Study of the thermal structure of a town in a narrow valley. – *Atmos. Environ.* 30, 365-378.
- Oke, T.R.**, (1997) Urban climates and global environmental change. – In *Applied Climatology* (eds: **Thompson, R.D. and Perry, A.**). Routledge, London-New York, 273-287.
- Oke, T.R. and Maxwell, G.B.**, (1975): Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. – *Atmos. Environ.* 9, 191-200.
- Park, H-S.**, (1986): Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities. – *Atmos. Environ.* 20, 1859-1866.
- Sümeghy, Z. and Unger J.**, (2003) Classification of urban heat island patterns. – *Acta Climatol. Univ. Szegediensis* 36-37, 93-100.
- Szegedi, S. and Kircsi, A.**, (2003) Effect of the synoptic conditions on the development of the urban heat island in Debrecen, Hungary. – *Acta Climatol. Univ. Szegediensis* 36-37, 111-120.
- Unger, J., Bottyán, Z., Sümeghy, Z. and Gulyás, Á.**, (2000) Urban heat island development affected by urban surface factors. – *Időjárás* 104, 253-268.